

混凝土在碳化和干湿循环作用下的抗硫酸盐腐蚀性能

杨礼明¹, 余红发^{*1}, 麻海燕¹, 周鹏², 韩丽娟³

(1. 南京航空航天大学土木系 南京 210016; 2. 南京长安建筑规划设计有限公司 南京 210002; 3. 抚顺市规划设计研究院 抚顺 113008)

摘要: 采用自然浸泡和干湿循环的试验方法, 研究了碳化后的粉煤灰混凝土 (FAC), 大掺量矿物掺合料混凝土(HVMAC), 以及高性能混杂纤维增强膨胀混凝土 (HPHFREC) 在 5% 硫酸镁溶液中的损伤过程。结果表明: 碳化一定程度上密实混凝土表层, 但改变混凝土表层的化学组成, 降低混凝土的抗硫酸镁腐蚀性能。干湿循环加速硫酸镁的扩散作用, 扩展混凝土内部原有的微裂缝。在碳化+硫酸镁双重破坏因素作用下, HVMAC 具有优秀的抗腐蚀性能, 适合应用于硫酸镁腐蚀的严酷环境; 在碳化+干湿循环+硫酸镁多重破坏因素作用下, HPHFREC2 的三元纤维混杂起到明显的增强增韧效果, 抗腐蚀性能较好。

关键词: 混凝土; 碳化; 干湿循环; 硫酸镁; 相对动弹性模量

中图分类号: TU528

文献标示码: A

Resistance of concrete to magnesium sulfate attack under combined action of carbonation and dry-wet cycles

YANG Li-ming¹, YU Hong-fa^{*1}, MA Hai-yan¹, ZHOU Peng², HAN Li-juan³

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing; 210016; 2. Nanjing Changan architectural Planning and Design Co., Ltd., Nanjing, 210002; 3. Fushun institute of planning and design, Fushun, 113008)

Abstract: Deterioration of carbonized fly ash concrete (FAC), concrete with high volume mineral admixture (HVMAC), and high performance hybrid fibers reinforced expansive concrete (HPHFREC) exposed to 5% magnesium sulfate solution was investigated. Two corrosion regimes were employed: natural immersion and dry-wet cycle. Experiment results show that carbonation changes the chemical component of concrete surface and reduces the resistance of concrete to magnesium sulfate attack, though carbonation compacts the concrete surface to some extent. The dry-wet cycles accelerates the diffusion of magnesium sulfate and develops the micro-crack of concrete. Under combined action of carbonation and magnesium sulfate, HVMAC gets the best resistance to sulfate attack and is applicable to the atrocious environment, but FAC which was broken up is not applicable to the concrete engineering in such environment. Under combined action of carbonation, dry-wet cycle, and magnesium sulfate, HPHFREC2, of which the reinforced effect of the fibers is obviously well, shows the better resistance of concrete to sulfate attack.

Key words: concrete; carbonation; dry-wet cycles; magnesium sulfate; relative dynamic modulus of elasticity

收到初稿日期: 2011-09-25; 收到修改稿日期: 2012-02-17; 网络出版时间 2012-07-11 10:14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20120711.1014.009.html>

DOI:

基金项目: 国家 973 计划项目(2009CB623203); 江苏省自然科学基金前期预研项目(BK2005216); 2008 年西宁市建设委员会项目 (2010-001); 2010 浙江省建设厅科技项目 (1006)

通讯作者: 余红发, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为

E-mail: yuhongfa@nuaa.edu.cn

实际工程中混凝土的耐久性问题十分复杂，除了原材料的多样性，本身结构的复杂性外，还需考虑环境、气候等多种破坏因素共同作用。硫酸盐侵蚀，碳化和干湿循环等是常见的影响混凝土耐久性的因素，国内外学者在这些混凝土耐久性问题上做了大量的研究。S.U. Al-Dulaijan 等^[1]研究了混凝土在不同浓度硫酸钠溶液中的抗腐蚀性能，认为浓度越高硫酸盐腐蚀越严重；K.K. Sideris 等^[2]探索了矿物掺合料对混凝土抗硫酸盐腐蚀性能和碳化深度的影响，发现粉煤灰混凝土的碳化率最低；E.E. Hekala 等^[3]指出掺加 40%粉煤灰和 5%碳酸钙的混凝土具有较好的抗腐蚀性能，干湿循环加速硫酸盐对混凝土的腐蚀；P.J.Tikalsky 等^[4]研究了粉煤灰混凝土的硫酸盐腐蚀损伤过程，认为低钙粉煤灰混凝土的抗硫酸镁腐蚀性能比较优秀；余红发等^[5]研究表明，碳化作用改善了混凝土的抗卤水冻蚀性能；文献[6-8]探讨了干湿循环对混凝土抗硫酸盐腐蚀性能的影响。但是，这方面的研究大多是关于混凝土在单一破坏因素或者双重破坏因素（碳化+硫酸镁，干湿循环+硫酸镁）作用下的抗腐蚀性能，目前关于混凝土在碳化+干湿循环+硫酸镁多重破坏因素作用下的抗腐蚀性能研究还比较少。文献[9]对未碳化混凝土在硫酸镁条件下的抗腐蚀性能做了详细阐述，本文作者通过制备粉煤灰混凝土（FAC），大掺量矿物掺合料混凝土（HVMAC），高性能混杂纤维增强膨胀混凝土（HPHFREC），采用更贴近实际工程的自然干湿循环方法，进行相关碳化和硫酸盐侵蚀试验，研究混凝土在碳化+干湿循环+硫酸盐多重破坏因素作用下的损伤失效过程，探讨混凝土的抗硫酸盐腐蚀性能，优化严酷腐蚀条件下混凝土的配

合比设计。

1 试验

1.1 原材料

试验采用 P.II 52.5R 硅酸盐水泥，I 级粉煤灰（Fly ash, FA），S95 级磨细矿渣（Slag, SG），硅灰（Silica fume, SF），其 SiO_2 含量超过 93%，铝酸盐混凝土膨胀剂（Aluminate expansion agent, AEA）。黄砂，细度模数 2.72，属于 II 区级配，中砂。玄武岩碎石，最大粒径 13mm，基本属于 5~10 mm 连续级配。HP400R 型聚羧酸缓凝高效减水剂，JM-B 型萘系高效减水剂，液体 JM-2000c 高效引气剂，推荐掺量为 $5 \times 10^{-7}\% \sim 10^{-6}\%$ 万分之 0.005%~0.01%。束状单丝聚丙烯纤维，密度 0.91 g/m^3 ，长度 19 mm，直径 0.048 mm，弹性模量 ≥ 3.5 GPa。高性能改性聚酯单丝纤维，密度 1.36 g/m^3 ，长度 18 mm，直径 0.03~0.06 mm，弹性模量 14~18 GPa。GS-2005-3 哑铃型钢纤维，长度 20 mm，等效直径 0.45 mm，长径比 44.4，弹性模量 200 GPa。

1.2 配合比

设计了 4 种混凝土：（1）掺加 20%FA 的 FAC（其中掺加 FA 的比重为质量分数，下同）；（2）复合掺加 40%FA+10%SG+5%SF 的 HVMAC；（3）在 HVMAC 基础上掺加 0.1%聚丙烯纤维、0.7%钢纤维、10%AEA 和 0.008%的 JM-2000c 高效引气剂的 HPHFREC1；（4）在 HPHFREC1 的基础上，用聚酯纤维取代 50%聚丙烯纤维的 HPHFREC2。混凝土的具体配合比、坍落度和标准养护 28 d 的混凝土立方体抗压强度见表 1。

表 1 混凝土的配合比和性能

Table 1 Mixed proportions and properties of different concretes

Sample	Mixed proportion/(kg m ⁻³)								Superpla -sticizer /%	Slump /mm	Compressive strength(28d) /MPa
	Cement	FA	SG	SF	AEA	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water			

FAC	304	76	0	0	0	775	1 235	171	0.8*	65	59.5
HVMAC	270	240	60	30	0	669	1 104	139	0.85**	80	50.7
HPHFR											
EC1	210	240	60	30	60	669	1 104	142	1.2**	100	60.6
HPHFR											
EC2	210	240	60	30	60	669	1 104	142	1.2**	100	58.8

Notes: *JM-B type Superplasticizer; **HP400R type Superplasticizer;

1.3 试验方法

混凝土试件 (40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体) 成型保湿养护 24h 后拆模, 室温 (20±3℃) 下在饱和石灰水中养护 28d。在自然界中, 混凝土碳化是一个很漫长的过程, 为了模拟碳化与硫酸镁腐蚀的共同作用过程, 本实验采用先将试件快速碳化 28d, 然后置于硫酸镁腐蚀溶液浸泡的方法来实现。试件一组采用自然浸泡, 另一组采用自然干湿循环, 腐蚀介质为 5% 硫酸镁溶液。

快速碳化试验方法参照 GBJ82-85《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》执行, 采用江苏省建筑科学研究院生产的 CCB-70A 型混凝土碳化试验箱, 碳化试验箱环境参数设置为: 温度 20℃±3℃、相对湿度 70%±5% 和 CO₂ 浓度 20%±3%, 在快速碳化 28d 后用 1% 酚酞酒精溶液测定试件的碳化深度。干湿循环以 7d 为一个周期, 试件一半浸泡在腐蚀溶液, 一半暴露在大气, 3.5 d 之后将试件两端调转, 3.5 d 后再掉转试件, 如此循环。

在腐蚀试验过程中, 每间隔一定的时间 (大概为 10 次干湿循环, 即 70d) 测量一次混凝土试件的动弹性模量 (E_d) 和质量, 通过这 2 个参数来计算混凝土的相对动弹性模量 (E_{rd}) 和质量损失。E_d 的测定采用 NM-4B 型非金属超声波检测分析仪, E_{rd} 计算公式见文献[10]; 质量的测量采用精度为 0.1 g 的电子天平, 质量损失率的计算公式为:

$$W_l = \frac{G_t - G_0}{G_0} \times 100\%$$

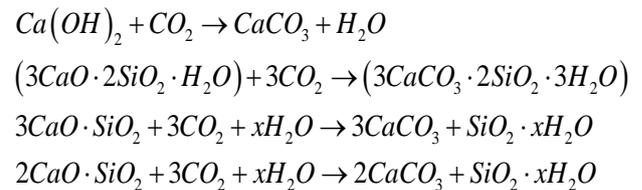
其中, W_l 为质量损失率; G₀ 为试件初始质量; G_t 为试件腐蚀 t 时间后的质量。

2 结果与讨论

2.1 混凝土在碳化+5%硫酸镁溶液中自然浸泡条件下的腐蚀行为

在标准快速碳化条件下碳化 28d (相当于自然碳化 50 年), 通过酚酞酒精溶液测试, 得 FAC, HVMAC 和 HPHFREC 的碳化深度分别为 0.2 mm, 3.3 mm 和 7.8 mm, 可见 HPHFREC 的碳化速度最快, HVMAC 次之, 而 FAC 基本不碳化。

图 1 给出了 4 种混凝土在碳化+硫酸镁腐蚀条件下的 E_{rd} 和质量变化规律。碳化过程中, CO₂ 与混凝土中的水化产物 Ca(OH)₂, CSH, C₃A, C₂A 反应, 生成 CaCO₃ 和无定型的水化 SiO₂, 一定程度上密实了混凝土表层, 其主要反应方程式为^[11]:



碳化后混凝土强度有一定程度的提高, 在图 1a 中表现为 E_{rd} 曲线存在初始上升段, 但随着腐蚀试验的进行, E_{rd} 加速下降。混凝土腐蚀破坏标准采用 E_{rd} 下降到 60% 或者质量损失达到 5%。由图 1a 可见, FAC 最早破坏, 在 469d 时 E_{rd} 下降到 60%, 到 539d 时开裂, E_{rd} 下降为 0; HPHFREC1 和 HPHFREC2 在 868d 时破坏, E_{rd} 分别为: 52%

和 58%；HVMAC 的抗硫酸镁腐蚀性能较好，经过 868d 的自然浸泡， E_{rd} 值为 63%，临近破坏。可见，在碳化+硫酸镁腐蚀条件下，4 种混凝土的腐蚀程度为：FAC>HPHFREC1>HPHFREC2>HVMAC。与未碳化混凝土^[9]相比，碳化后混凝土的抗腐蚀性能降低，这是由于碳化后，混凝土内部硫铝酸盐分解生成的硫酸根离子通过浓度扩散作用向未碳化区域迁移^[12]，导致混凝土未碳化区域提前遭受硫酸盐腐蚀，生成膨胀性腐蚀产物石膏和钙矾石，当产生的膨胀应力大于混凝土的抗拉强度时，混凝土内部出现微裂纹，随着反应的进行，微裂纹不断增加，发

展贯通，最终导致混凝土开裂。

在碳化+硫酸镁腐蚀条件下，混凝土的质量变化规律如图 1b 所示，呈缓慢增长趋势。经过 868d，HPHFREC1 和 HPHFREC2 的质量分别增长了 2.6% 和 2.5%；在整个实验过程中，HVMAC 质量变化不大，期间质量增长峰值为 0.6%，到 868d 时质量为初始重量，期间未发生质量损失；FAC 在 469d 时质量增长到 1.9%，但随后在 539d 时开裂，出现质量损失，在 E_{rd} 下降为零时其质量损失达到 3.4%。

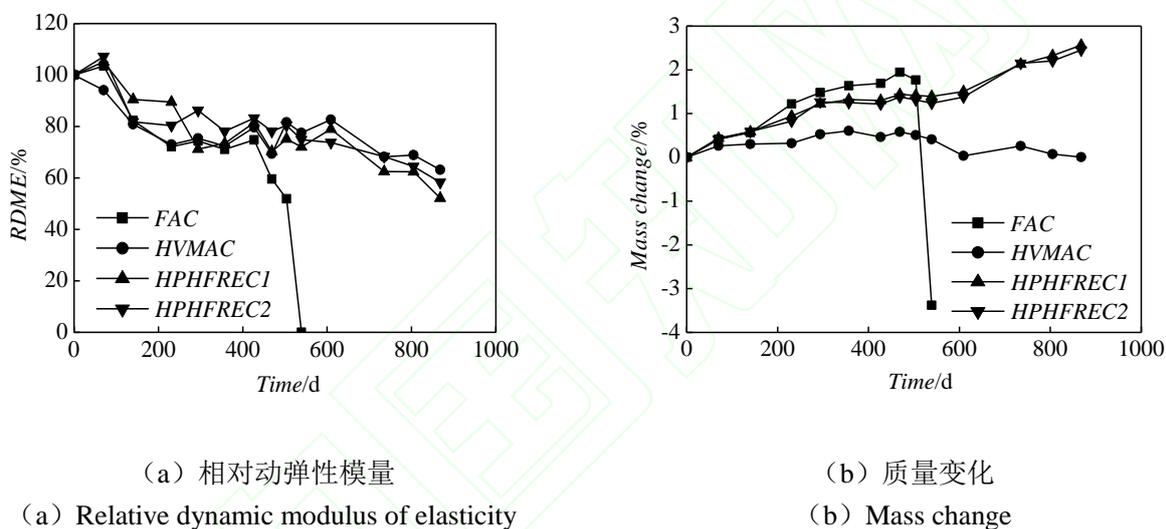


图 1. 混凝土在碳化+硫酸镁腐蚀条件下的相对动弹性模量和质量变化规律
Fig.1 Relative dynamic modulus of elasticity and mass change of concrete under combined action of carbonation and magnesium sulfate attack

2.2 混凝土在碳化+干湿循环+硫酸镁多重因素作用下的腐蚀行为

图 2 为 4 种混凝土在碳化+干湿循环+硫酸镁多重破坏因素作用下的 E_{rd} 和质量变化规律。可以看出，混凝土 E_{rd} 曲线缺少初始上升段，呈不断下降趋势。这表明干湿循环加速了硫酸镁对混凝土的化学腐蚀，抵消了碳化对混凝土的强化作用。FAC 在 67~72 次干湿循环之间开裂， E_{rd} 从 84% 下降为 0；HVMAC，HPHFREC1 和 HPHFREC2 在经过 124 次干湿循环后 E_{rd} 分别下降到 55%，54% 和 61%，HVMAC 和 HPHFREC1 腐蚀破坏，HPHFREC2 临

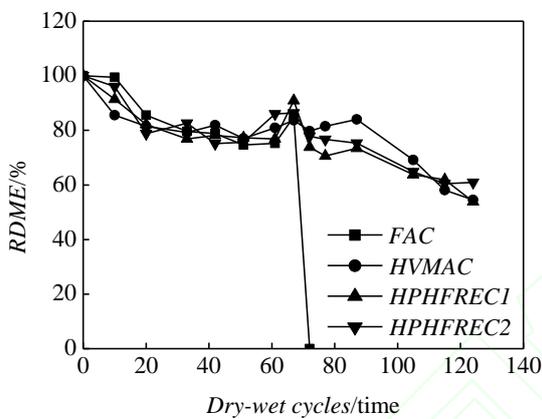
近失效。碳化会导致混凝土未碳化区域提前遭受硫酸盐侵蚀，而干湿循环一方面会给混凝土一个疲劳拉应力，扩展混凝土原有的缺陷；另一方面使得 SO_4^{2-} 快速通过碳化区域，未碳化区 SO_4^{2-} 浓度急剧增加，从而加速混凝土内部的化学反应，产生大量的膨胀性腐蚀产物。在碳化+干湿循环的双重作用下，混凝土内部微裂纹不断产生和发展，腐蚀速度明显大于碳化或者干湿循环单一作用。在碳化+干湿循环+硫酸镁严酷腐蚀环境下，HPHFREC2 具有最优的抗腐蚀性能，碳化 FAC

的抗腐蚀性较差, 不适合用于碳化+干湿循环+硫酸镁的多重破坏因素腐蚀环境。

由图 2b 可见, 在碳化+干湿循环+硫酸镁作用下, 混凝土的质量变化规律和碳化+硫酸镁双重破坏因素腐蚀条件下(图 1b)一致, 呈不断上升趋势, 这一现象说明干湿循环不改变混凝土的质量变化规律。在 124 次干湿循环过程中, HVMAC 质量无明显变化, 这说明 HVMAC 的剥落量与腐蚀产物填充孔隙的量基本相等; HPHFREC1 和 HPHFREC2 的

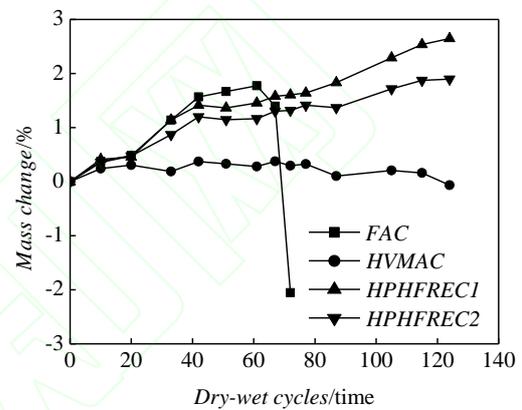
质量分别增长了 2.6%和 1.9%, 这是由于掺加的纤维发挥了较好的增韧效果, 把表层混凝土很好的连结在一起, 混凝土表面剥落量小于腐蚀产物的填充量。在 72 次干湿循环时, FAC 开裂, E_{rd} 下降为零, 质量损失 2.1%;

综上, 对比图 1 和图 2 易见, 与自然浸泡条件下相比, 干湿循环降低了碳化后混凝土的抗腐蚀性能。



(a) 相对动弹性模量

(a) Relative dynamic modulus of elasticity



(b) 质量变化

(b) Mass change

图 2.混凝土在碳化+干湿循环+硫酸镁双重破坏因素作用下的相对动弹性模量和质量变化规律
Fig.2 Relative dynamic modulus of elasticity and mass change of concrete subjected to the combined action of carbonation, dry-wet cycles and magnesium sulfate

表 2 列出了混凝土在碳化+硫酸镁双重破坏因素和碳化+干湿循环+硫酸镁多重破坏作用下的抗压强度。FAC 在损伤失效时断裂, 失去整体连结性, 抗压强度无法测量。与 28d 抗压强度相比, 在碳化+硫酸镁双重破坏作用下, HPC, HPHFREC1 和 HPHFREC2 损伤失效时的抗压强度分别下降了 36%, 48%和 34%; 在碳化+干湿循环+硫酸镁多重破坏作用下, HPC, HPHFREC1 和 HPHFREC2 损伤失效时的抗压强度分别下降了 47%, 58%和 46%。

而与双重破坏因素相比, 在多重破坏因素作用下, HPC, HPHFREC1 和 HPHFREC2 损伤失效时的抗压强度分别下降了 11%, 18%和 17%。可见, 干湿循环加速混凝土强度损失。从抗压强度下降速度来看, HPHFREC2 的强度损失速度最慢, 抗腐蚀性能最好, 三元纤维混杂达到较好的效果, 掺加聚丙烯纤维和聚酯纤维有效的发挥了钢纤维的增强增韧效果, 改善了混凝土的性能^[13,14]。

表 2 混凝土的抗压强度
Table2 Compressive strength of concretes

Specimen	Compressive strength(28d) (MPa)	Final compressive strength (MPa)
----------	------------------------------------	-------------------------------------

FAC	T+MS	59.5	—
	T+DW+MS	59.5	—
HPC	T+MS	50.7	32.1875
	T+DW+MS	50.7	26.618
HPHFREC1	T+MS	60.6	31.114
	T+DW+MS	60.6	25.354
HPHFREC2	T+MS	58.8	38.253
	T+DW+MS	58.8	31.668

Notes: T-Carbonization; DW- Dry wet cycles; MS- Magnesium sulfate

2.3 混凝土在碳化+硫酸镁作用下的腐蚀破坏形态

图3给出了4种混凝土在碳化+硫酸镁腐蚀条件下的破坏形态。经过539d的自然浸泡，FAC发生断裂，两端头明显破损；在868d时，HVMAC的表面仍然光滑平整，无明显剥落和裂缝；HPHFREC1右端头出现裂缝，但表面无剥落；碳化HPHFREC2表面出现轻微剥落，裸露的钢纤维锈蚀，端头出现裂缝。在碳化+硫酸镁腐蚀条件下，一方面，当内部腐蚀产物产生的膨胀应力大于混凝土抗拉应力时，混凝土出现开裂，甚至整体溃散，如图3a中FAC，HPHFREC1和HPHFREC2，但是由于聚酯纤维和聚丙烯纤维产生的增韧效果，HPHFREC1和

HPHFREC2虽然开裂仍保持很好的整体性；另一方面，扩散到混凝土内部的 $MgSO_4$ 与CSH发生脱钙反应，生成无胶结能力的物质，该反应主要发生在混凝土内部的薄弱部位，如骨料界面处，一定程度上降低了混凝土的强度，同时易产生微裂纹，导致表面剥落，但由于碳化过程中 CO_2 将混凝土表层的 $Ca(OH)_2$ 消耗殆尽， $MgSO_4$ 的脱钙反应从内部的未碳化区发起，碳化有效的抑制了混凝土的表面剥落，如HVMAC表现出较好的抗剥落性能。 Mg^{2+} 的脱钙反应方程式^[15]为：

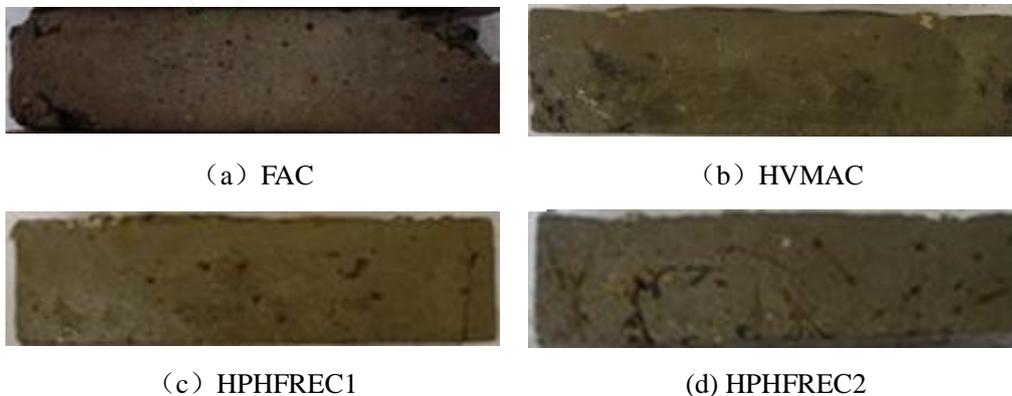
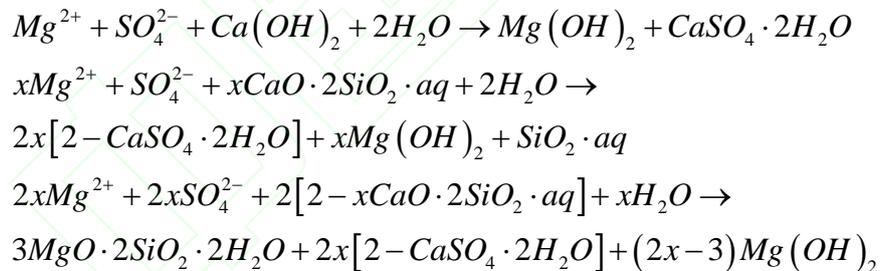


图3.混凝土在碳化+硫酸镁腐蚀作用下的破坏形态

Fig.3 Photograph of concrete under combined action of carbonation and magnesium

2.4 混凝土在碳化+干湿循环+硫酸镁多重破坏因素作用下的腐蚀破坏形态

图4为4种混凝土在碳化+干湿循环+硫酸镁多重因素作用下的破坏形态。可以看出,多重因素作用下混凝土的破坏形态与碳化+硫酸镁双重破坏因素作用下相似。经过72次干湿循环,FAC断裂,裂纹贯通整个混凝土试件(图4a),端头破损,干湿循环所产生的疲劳拉应力,其破坏程度比双重破坏因素作用下(图3a)严重;124次干湿循环后,HVMAC表面出现剥落,石子外露,有细微裂纹;HPHFREC1右端头开裂,裂纹贯通混凝土的整个横截面,但由于聚丙烯纤维和钢纤维的增韧效果,混凝土仍保持很好的整体性;碳化HPHFREC2表面出现轻微剥落,无裂缝产生,可见聚酯纤维+聚丙烯纤维+钢纤维的三元纤维混杂产生了较好的增强增

韧效果,较好的抑制了表面剥落和内部裂缝的发展。在碳化+干湿循环+硫酸镁多重因素作用下,FAC的抗腐蚀性能较差,HPHFREC2的抗腐蚀性能最佳。对比图3和图4可见,在多重破坏因素作用下混凝土的腐蚀破坏程度比双重破坏因素作用下严重,这主要是由于:一方面,在干湿循环过程中,混凝土吸湿时会膨胀,干燥时会收缩,相当于在承受一个反复拉应力,这一拉应力会使混凝土内部产生微裂纹或者导致原有微裂纹扩展和贯通;另一方面,干湿循环会使得混凝土内部形成高浓度硫酸盐孔溶液,而碳化又使得混凝土未碳化的核心区域提前遭受硫酸盐侵蚀,产生膨胀性腐蚀产物,加剧混凝土的劣化,干湿循环和碳化共同作用,产生了损伤的叠加效果,加速混凝土的失效。

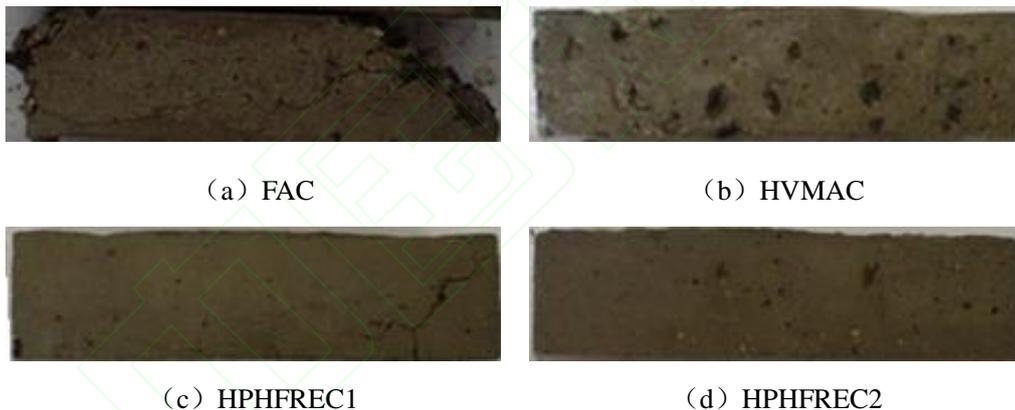


图4.混凝土在碳化+湿循环+硫酸镁多重因素作用下的破坏形态

Fig.4 Photograph of concrete subjected to the combined action of carbonation, dry-wet cycles and magnesium sulfate

3. 结论

(1) 碳化对混凝土起到一定的密实作用,一定程度上增加混凝土强度,但由于浓度扩散作用,会使得混凝土未碳化区域提前发生硫酸盐侵蚀。

(2) 干湿循环抵消碳化对混凝土的强化作用,使混凝土内部快速形成高浓度硫酸盐孔溶液,加速硫酸镁的化学腐蚀作用。

(3) 在碳化+硫酸镁双重破坏因素作用下,

HVMAC具有最优的抗硫酸盐腐蚀性能。大掺量矿物掺合料的配合比适用于碳化+硫酸镁作用下的混凝土工程。

(4) 在碳化+干湿循环+硫酸镁多重因素作用下,混凝土遭受很严重的腐蚀,HPHFREC2具有优秀的抗腐蚀性能,三元混杂纤维取得明显的增强效果,HPHFREC2配合比适用于碳化+干湿循

环+硫酸镁作用下的严酷腐蚀环境。

(5) 在严酷腐蚀环境下, FAC 断裂, 失去整体连结性, HPHFREC1 的强度损失速度最快, HPHFREC2 有较好的强度保持能力。

参考文献:

- [1] Al-Dulaijan S U, Maslehuddin M, Al-Zahrani M M, et al. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2003, 25 (4/5): 429-437.
- [2] Sideris K K, Savva A E, Papayianni J. Sulfate resistance and carbonation of plain and blended cements[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2006, 28 (1): 47 - 56.
- [3] Hekala E E, Kisharb E, Mostafab H. Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32 (9) :1421-1427.
- [4] Tikalsky P j, Carrasquillo R L. Influence of fly ash on the sulfate resistance of concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 1992, 89(1):69-75.
- [5] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 盐湖地区干燥气候和碳化作用对混凝土强度和耐久性的影响 [J]. *混凝土*. 2003(10): 28-31.
- YU Hong-fa, SUN Wei, YAN Liang-hui, et al. Durability of concrete in salt lake I : Influence of desiccation and carbonation [J]. *Concrete*, 2003(10): 28-31.
- [6] 王琴, 杨鼎宜. 干湿循环对混凝土硫酸盐侵蚀的影响[J]. *混凝土*, 2008, (3): 22-24.
- WANG Qin, YANG Ding-yi. Influence of the dry-wet circulation on the concrete sulfate attack [J]. *Concrete*, 2008, (3): 22-24.
- [7] 周永祥, 阎培渝. 固化盐渍土经干湿循环后力学性能变化机理[J]. *建筑材料学报*, 2006, 9(6): 735-741.
- ZHOU Yong-xiang, YAN Pei-yu. Mechanism of Alteration in Mechanical Property of Solidified Saline Soil Affected by Wetting-Drying Cycles [J]. *Journal of Building Materials*, 2006, 9(6): 735-741.
- [8] 张伟勤, 刘连新, 代大虎. 混凝土在卤水、淡水中的干湿循环腐蚀试验研究[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2006, 24(4): 25-29.
- ZHANG Wei-qin, LIU Lian-xin, DAI Da-hu. Experimental study of concrete corroding in brine and fresh water under dry-wet circulation [J]. *Journal of Qinghai University*, 2006, 24(4): 25-29.
- [9] YANG Li-ming, YU Hong-fa, Ma Hai-yan. Deterioration of High Performance Hybrid Fibers Reinforced Expansive Concrete Exposed to Magnesium Sulfate Solution[C]. *International conference on transportation engineering*, 2009, p2614-2619.
- [10] 罗骐先, Bungey J H. 用纵波超声换能器测量砼表面波速和动弹性模量[J]. *水利水运科学研究*, 1996, (3): 264-27.
- LUO Qi-xian, Bungey J.H. Using compression wave ultrasonic transducers to measure velocity of surface waves and dynamic modulus of elasticity for concrete [J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1996(3): 264-27.
- [11] 张誉, 蒋利学, 张伟平, 等. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海科学技术出版社, 2003: 34-36.
- ZHANG Yu, JIANG Li-xue, ZHANG Wei-ping, et al. Durability of concrete structures [M]. Shanghai Science and Technology Press, 2003: 34-36.
- [12] 柳俊哲. 混凝土碳化研究与进展(3)—腐蚀因子的迁移[J]. *混凝土*, 2006(1): 51-54.
- LIU Jun-zhe. A review of carbonation in

- reinforced concrete (III): Migration of corrosive factors in concrete [J]. *Concrete*, 2006(1): 51-54.
- [13] 罗立峰, 周建春, 黄培彦. 聚合物钢纤维混凝土的增强机理分析[J]. *复合材料学报*, 2002, 19(3): 46-50.
- LUO Li-feng, ZHOU Jian-chun, HUANG Pei-yan. Reinforced mechanism with the polymer latex added in the steel fiber reinforced concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(3): 46-50.
- [14] 徐松林, 唐志平, 胡元育, 等. 纤维增强水泥基复合材料压剪破坏的细观试验研究[J]. *复合材料学报*, 2005, 22(1): 92-101.
- XU Songlin, TANG Zhiping, HU Yuanyu, et al. Meso experimental investigation of fiber reinforced cementitious composites under compression and shear loading [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, 22(1): 92-101.
- [15] 刘赞群. 混凝土硫酸盐侵蚀基本机理研究 [D]. 长沙: 中南大学土木建筑学院, 2010.
- LIU Zan-qun. Study of the Basic Mechanisms of sulfate attack on cementitious materials [D]. Changsha: Central South University, 2010.